LA BOLA DE CRISTAL

AGUSTIN RELA

Programa de Epistemología, Lógica, Metodología e Historia de la Ciencia.
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad Nacional de Buenos Aires

Agradezco los valiosos comentarios de G. Boido, H. Mitelman, L. Varela y E. Flichman, su empeño al instarme a colaborar con un artículo, y sobre todo la paciencia que han demostrado al leer los borradores.

Con una lámpara quemada llena de agua se puede improvisar una esfera transparente y estudiar algunas de sus propiedades ópticas. De la construcción y uso de este elemento derivan referencias a la dilatación de los gases, la condensación del vapor, la producción de fuego, el incendio de bosques y el registro de la radiación solar.

Stokes

Se atribuye al matemático Jorge Gabriel Stokes (1819-1903) haber calculado por primera vez la velocidad que adquiriría una esfera al caer libremente en un medio de viscosidad uniforme, por ejemplo una esfera de metal en un recipiente con agua o una gota de lluvia en la atmósfera. Casualmente, también Stokes se ha referido al fenómeno conocido como arco iris, y dio una explicación basada en la reflexión y refracción de la luz solar en las gotas de lluvia, consideradas como esferas. Además todavía está en uso en algunas estaciones meteorológicas un aparato denominado *heliofanógrafo de Campbell-Stokes*, que se basa en una esfera de vidrio que deja un trazo quemado sobre un papel. Si consideramos las curiosas coincidencias entre Stokes y la esfericidad, resulta inevitable conjeturar que las esferas transparentes deben haber ejercido singular fascinación sobre el célebre matemático, fácilmente comprensible para cualquiera que haya tenido una en sus manos: sus complejos y variados efectos ópticos se prestan no solamente a las especulaciones geométricas, sino también a la observación libre, descansada e hipnótica, que la tradición ha querido asociar con lechuzas y adivinas.

¿Dónde conseguir una bola de cristal?

Parece exagerado decir que una institución oficial que posee un observatorio meteorológico ha tenido que importar de Europa una esfera de sólo 10 centímetros de diámetro. Probablemente haya en nuestra ciudad buenos vidrieros capaces de construir una con recursos moderados. Pero, al parecer, tal producto no tiene una aplicación muy difundida en el mercado, por lo que resulta difícil de adquirir y es preferible improvisarla.

Las lámparas incandescentes de 25 a 100 watts suelen tener una ampolla casi perfectamente esférica, de unos 6 centímetros de diámetro.

Tomemos una lámpara (si está quemada, mejor, para no inutilizar una buena), y llenémosla de agua. No es una operación sencilla e inmediata: hay riesgos de daño personal y de rotura. Después de ensayar varios procedimientos, recomiendo como más práctico el siguiente:

Se toma una sierra y se apoya su mariposa contra la pared, y el mango sobre el abdomen (figura 1). Tomemos la ampolla con la mano derecha, el culote con la izquierda, y sin hacer casi fuerza iniciemos un movimiento de vaivén con la lámpara. Si hacemos demasiada fuerza, se trabará la sierra y se dificultará la tarea. A los 8 ó 10 movimientos, habrá resultado un corte de unos 15 milímetros de longitud en la base roscada de bronce, por el que puede introducirse un cuchillo o el extremo de una hoja de sierra para romper el pico de vacío escondido dentro. Antiguamente las lámparas se cerraban al vacío para evitar que el filamento se incendiase al estar incandescente en una

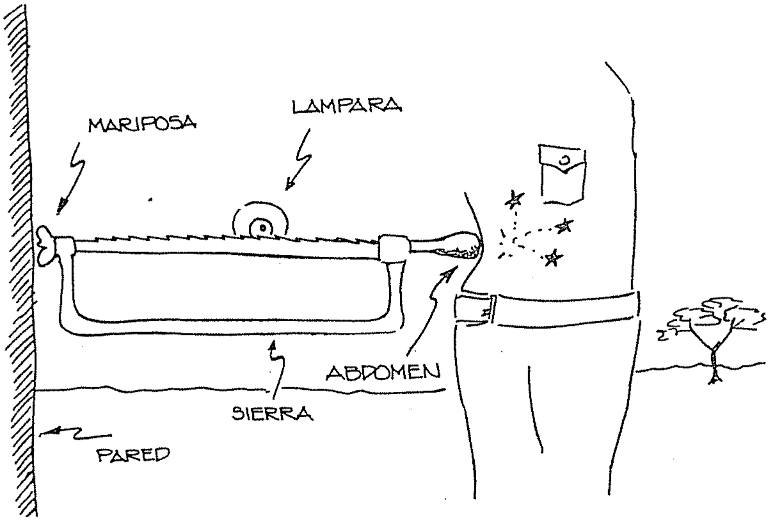


Figura 1a:
Para cortar la ampolla hay que tomarla
con ambas manos.

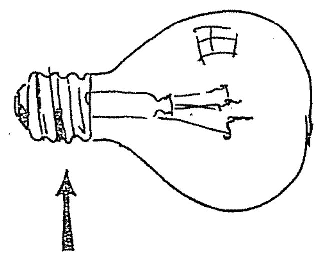


Figura 1b.

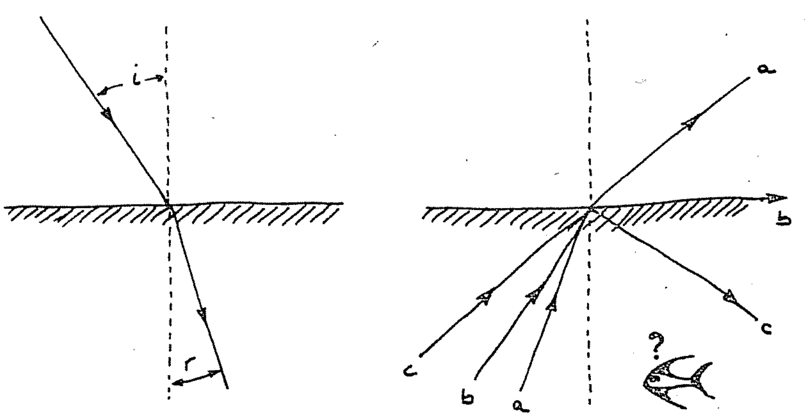


Figura 2:
A la izquierda, rayo incidente y refractado; a la derecha, rayo incidente y refractado, rayo incidente y rasante, y rayo incidente totalmente reflejado.

atmósfera con oxígeno. En esa época bastaba con romper el pico de vacío con la lámpara sumergida en un recipiente con agua para que ésta invadiese en pocos segundos el interior de la ampolla, hasta llenarla por completo (¿por el "horror al vacío"?). La tendencia actual es la de llenar la ampolla con gas inerte (nitrógeno, argón), que cumple la misma función que el vacío en cuanto a evitar que se queme el filamento, con una ventaja adicional, y es que al haber presión interior el filamento se sublima a menor velocidad, y por ello dura más tiempo y no se ennegrece la ampolla por dentro. La desventaja es que se gasta más energía eléctrica en calor, porque el gas interior entra rápidamente en convección y disipa una cantidad extra de calor.

Rompamos el pico de vacío con la lámpara sumergida: oiremos un ruido característico y veremos que la lámpara se llena en un 20% de agua. Esto muestra que la presión en frío era de aproximadamente 600 milímetros de mercurio (¿cuánto será la presión en caliente? ¿qué temperatura alcanza la lámpara cuando está en régimen? ¿se puede calcular con los datos que tenemos, o habrá que medirla? ¿y cómo la medimos? ¿soporta con la misma facilidad la ampolla una presión exterior que una interior, o una de ellas la rompe con mayor facilidad? ¿cómo medir el espesor del vidrio? ¿y sin romperlo? ¿vieron alguna vez cómo hacen los vidrieros para medir el espesor de un vidrio sin sacarlo? ¿arrimaron alguna vez una regla a un vidrio?).

A pesar de que la presión interna —en frío— es menor que la externa, al colocar una lámpara sobre la hornalla de gas, antes de estallar se forman protuberancias. En las selladas al vacío, se forman depresiones antes de la implosión.

Bien, ya tenemos un poco de agua dentro de la ampolla, pero queremos llenarla. Si la tomamos con la mano, siempre sumergida, la veremos burbujear (¿burbujas de aire? ¿de nitrógeno?). Al soltarla, el gas interior se enfría y se contrae, permitiendo que entre más agua. Reiterando este procedimiento, con algunas sacudidas adicionales, lograremos llenar una buena parte de la ampolla. No hay que tratar de succionar con la boca para hacer entrar al agua que queda capturada en lugares intermedios, porque probablemente haya sustancias tóxicas. Además, el gas residual de la lámpara tiene un sabor horrible.

Notaremos que no es posible con este procedimiento llenar la ampolla más allá del nivel del orificio de comunicación con el exterior. Toda dilatación y contracción en estas condiciones sólo logra hacer salir y entrar agua, sin ganancia neta. Parece que ya no hay manera de hacer entrar más agua. Pero hay.

Si hervimos a la ampolla, manteniéndola completamente sumergida con el auxilio de un alambre enrollado en su rosca y un contrapeso, comprobaremos con alarma que el agua que tanto trabajo nos costó hacer entrar comienza a salir a medida que el agua se calienta, mientras aumenta el tamaño de la burbuja de aire remanente (¿aire? ¿nitrógeno? ¿vapor de agua?). Cuando ya no burbujea más, apagamos el gas y dejamos que se enfríe. Para acelerar ese proceso podemos agregar agua fría, el vidrio no se romperá porque es muy delgado y adquiere rápidamente una temperatura pareja. Veremos cómo, a medida que se enfría, el agua entra otra vez a la ampolla hasta llenarla casi por completo. Quedará menos de un centímetro cúbico de gas, y es bueno que quede, a modo de amortiguador contra los esfuerzos de dilatación, de otro modo cuando sellemos la ampolla habrá riesgo de rotura, porque el líquido no es compresible, y el gas sí.

Para evitar que la ampolla gotee cada vez que cambia la presión o la temperatura, es necesario sellar la ranura por la que entró el agua, y a ese efecto es adecuado un adhesivo flexible u otro sellador.

Hacer fuego

Si hay buen sol, podemos quemar un papel u otro objeto usando la ampolla llena de agua como una lupa. Es molesto y peligroso observar directamente las manchas brillantes de luz solar concentrada; conviene proteger la vista con anteojos oscuros o entrecerrando los ojos.

Observaremos que la distancia a la que se produce el punto de máximo brillo o máxima concentración óptica es de aproximadamente 3 centímetros a partir del vidrio de la ampolla, es decir, 6 centímetros a contar desde el centro de la esfera. Veremos no solamente un punto luminoso equivalente a la imagen del sol, sino una zona de iluminación difusa alrededor, más los efectos asimétricos derivados de la forma de pera de la ampolla. La iluminación difusa —que estará presente aun en el caso de tratarse de una esfera transparente perfecta— obedece a que no se constituye una imagen focal en el sentido estricto, sino que existe un foco sólo para los rayos luminosos que pasan muy cerca del centro: para rayos muy alejados del centro de la esfera, el punto de cruce es diferente. ¿Por qué aparece, sin embargo, un foco? Si los rayos se entrecruzan a distancias variables, entonces no habrá ningún punto privilegiado al que podamos llamar foco. Ocurre que a medida que disminuye la distancia entre el rayo incidente y el eje de la esfera, el punto donde se entrecruzan todos los rayos que guardan esa distancia y que conforman un cilindro concéntrico con el eje, ese punto de intersección se va desplazando, pero cuando la distancia entre rayo y eje tiende a cero, la posición del punto de intersección tiende a un valor fijo, y se produce una acumulación de rayos en ese sitio, lo que origina un foco aproximado.

En la demostración que veremos, esa aproximación está representada por el reemplazo del seno de un ángulo por el ángulo mismo, justificándonos en la popular afirmación de que "para ángulos chicos, el ángulo es aproximadamente igual a su seno". Esto merece una explicación un poco más rigurosa. ¿Por qué no decimos que para valores chicos de x, el valor de x es aproximadamente igual al valor del doble de x? (Efectivamente, si x es grande, por ejemplo 5.000, resulta claro que 5.000 es muy diferente del doble 10.000, en cambio si x es chico, por ejemplo 0,001, su diferencia respecto del doble 0,002 alcanza a sólo un milésimo). Lo que ocurre con el ángulo y su seno es un tanto diferente:

ángulo (en radianes)	seno del ángulo
1	0,841471...
0,1	0,0998334...
0,01	0,0099998...

No sólo se reduce la diferencia entre el seno y el ángulo (lo que es lógico por tratarse de la diferencia entre números cada vez más pequeños), sino que esa diferencia se reduce *porcentualmente*: para ángulos de un centésimo de radián el ángulo y el seno difieren en menos del dos por diez mil, mientras que para valores de x iguales a 0,01, la diferencia entre x y el doble de x es del 50 por ciento. En forma abreviada, la diferencia entre ángulo y seno es infinitésimo de orden mayor que uno, mientras que la diferencia entre x y su doble es infinitésimo de orden uno.

En la demostración de la distancia focal de la esfera se hace la aproximación que resulta de la eliminación de los infinitésimos de orden superior a uno.

Demostración de la fórmula de la distancia focal

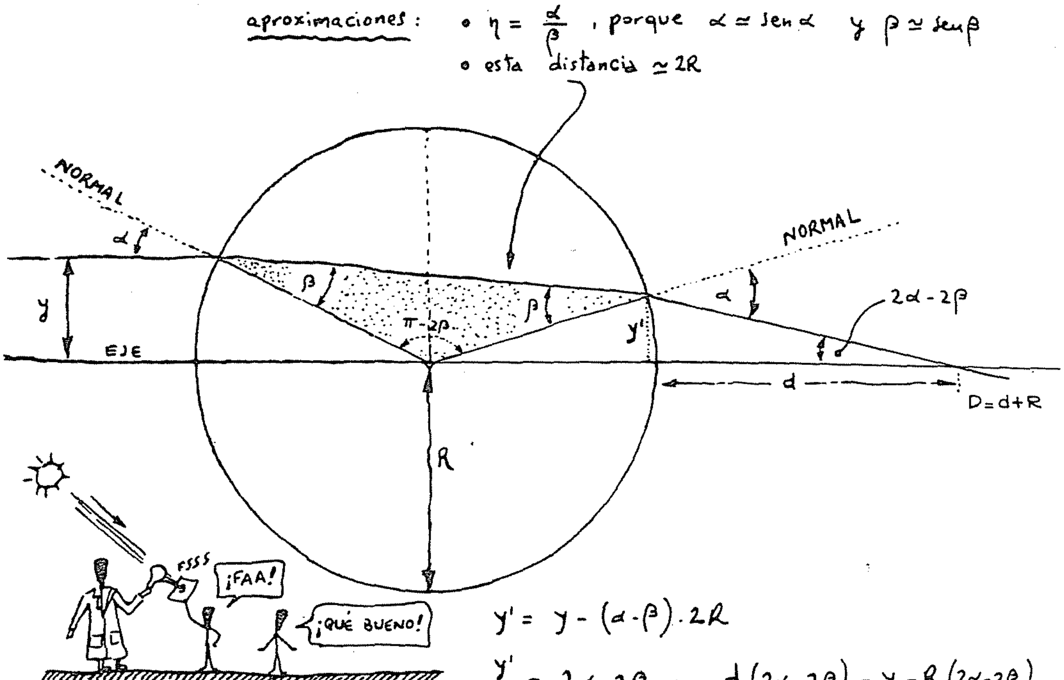
El siguiente formuleo es realmente muy aburrido, y el lector haría bien en saltar toda esta parte. En vista de que no hace caso y sigue leyendo, por esta vez pasaré la demostración a las correspondientes figuras, y aprovecharé para señalar que las demostraciones geométricas son fuente de placer sólo cuando constituyen el resultado del propio esfuerzo de razonamiento, cuando uno sabe que posee todos los datos necesarios y que sólo resta operar con ellos. En cambio, resulta verdaderamente insufrible seguir paso a paso los razonamientos ajenos.

El punto de partida de la demostración es la ley de Snell, que establece que el ángulo de incidencia y el de refracción están relacionados por la fórmula:

$$\text{sen } i \,/\, \text{sen } r = n \qquad \text{(n: índice de refracción)}$$

Los ángulos deben medirse respecto de la recta perpendicular a la superficie que separa ambos medios de propagación (figura 2).

Una especulación inmediata que propone la ley de Snell es: ¿Qué sucede si el ángulo de incidencia es de 90 grados (luz rasante)? ¿y qué sucede si la luz incide desde el medio más denso al menos denso, con ángulos mayores que arc sen (1/n)? Las fórmulas se limitan a responder: Caso 1, la luz pasará al medio más denso con un ángulo igual a arc sen (1/n). Caso 2, aparece un arco cuyo seno es mayor que 1, y el problema parece no tener solución. Sí, pero... ¿qué ocurre? El rayo de luz se da por vencido? La respuesta física difiere de la respuesta matemática, como en muchos otros casos en que se utiliza la matemática sin prever todos los casos físicos posibles. En el caso de la luz rasante, no pasa al medio más denso, en cambio, sí suce-



$$y' = y - (\alpha - \beta) \cdot 2R$$

$$\frac{y'}{d} = 2\alpha - 2\beta \; ; \quad d(2\alpha - 2\beta) = y - R(2\alpha - 2\beta)$$

$$d = \frac{y}{2\alpha - 2\beta} - R = \frac{\alpha R}{2\left(\alpha - \frac{\alpha}{\eta}\right)} - R = R\,\frac{1 - \eta/2}{\eta - 1}$$

Figura 3a:
Para demostrar la fórmula de la distancia focal hay que hacer aproximaciones que equivalen a no considerar infinitésimos de orden superior a uno.

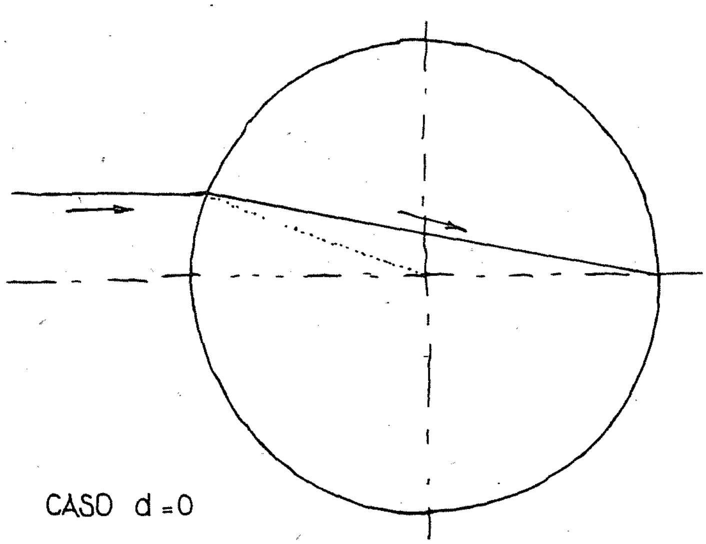


Figura 3b.

de que a medida que el rayo se hace cada vez más parecido al rasante, el rayo refractado adopta un ángulo cada vez más parecido a arc sen (1/n).

En el caso 2, no hay rayo refractado y se produce la reflexión total hacia el medio denso, principio que se utiliza en los anteojos prismáticos. Un hombre rana sumergido, en consecuencia, cuando mira hacia arriba ve el cielo a través de un círculo de un cierto diámetro, y si mira más hacia el costado, sólo verá el fondo del mar reflejado en su superficie, todo esto siempre que exista suficiente calma y transparencia.

A veces se aprecian efectos de reflexión total cuando se apoya un vaso sobre la mesa. La superficie de la mesa aparece visible sólo cuando se moja con un poco de agua el espacio de contacto entre el vaso y la mesa; cuando ese espacio está seco, la superficie de la mesa queda oculta tras una superficie espejada. En determinados ángulos se puede apreciar un efecto muy llamativo de realce de las impresiones digitales: aparece visible sólo la parte de piel que está en contacto con el vaso, con el color de la piel, sobre fondo plateado. ¿Qué distancia es *estar en contacto*? ¿cero? ¿Existen en el universo distancias iguales a cero? El efecto de apariencia por contacto tiene lugar antes de tocarse las superficies, cuando las distancias de separación ya resultan comparables a la longitud de onda de la luz empleada (décimos de micrón).

La figura 3 ilustra el razonamiento que conduce a la fórmula de la distancia focal de la esfera. Se supone una familia de rayos paralelos que incide sobre la esfera. Uno de esos rayos, el único dibujado, incide a una distancia *y* del eje de simetría. Ese rayo se refracta al penetrar la esfera, y vuelve a refractarse al salir. Por simetría o razonamiento reversible, los dos ángulos señalados con alfa son iguales entre sí. Los ángulos beta son iguales por simetría geométrica. El triángulo sombreado es isósceles por tener dos lados iguales (al radio). Se pretende calcular a qué distancia *D* del centro de la esfera, o *d* de la superficie posterior de la esfera cruza el rayo al eje de simetría.

El resultado, al que se llega utilizando la aproximación de reemplazar a los senos de los ángulos por los ángulos mismos, es:

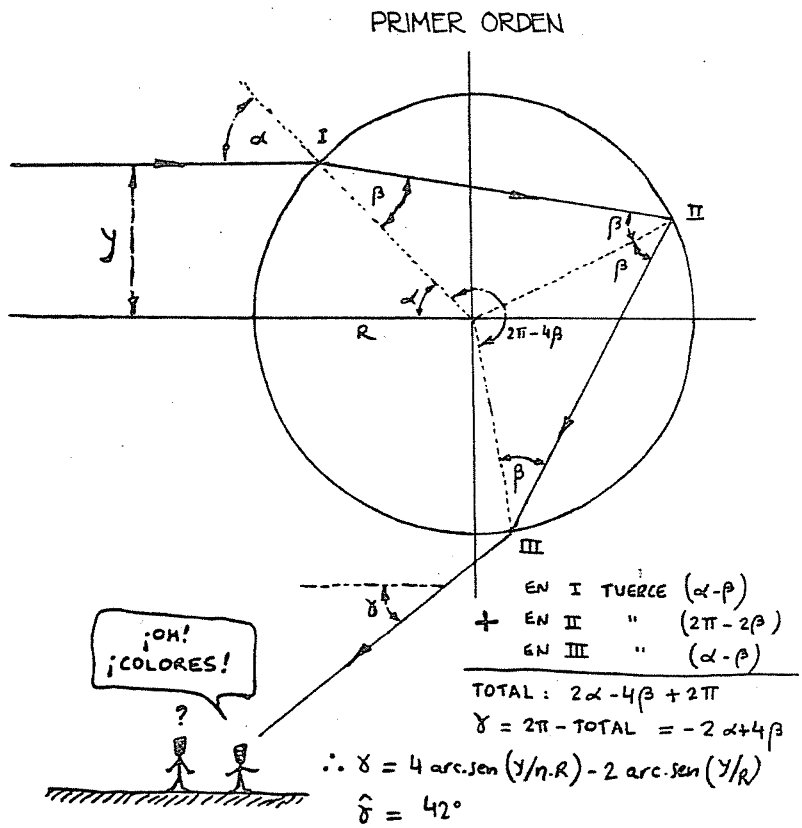
$$d = R \cdot \frac{1 - n/2}{n - 1}$$

La letra n es el índice de refracción, R el radio de la esfera, y d es la distancia entre el foco y la superficie de la esfera más próxima al foco.

Especulemos sobre qué valor debería tener el índice de refracción para que la distancia d sea cero. En la fórmula de la distancia focal, si hacemos el reemplazo y despejamos *n*, resulta ser igual a 2. Esto, por otra parte, resulta inmediatamente de la figura, redibujada para el caso de distancia cero. El ángulo alfa es el doble del ángulo beta, por ser un arco central y un arco perimetral que delimitan el mismo arco capaz. La aproximación entre seno y ángulo conduce inmediatamente a un índice de refracción igual a 2. Lo interesante de este caso es que una esfera tal *se autoincineraría* al darle el sol: se quemaría a sí misma, salvo que fuese tan transparente que la altísima intensidad de radiación la atravesase sin casi absorción. ¿Existen en la naturaleza tales índices de refracción? ¿No será que el índice de refracción de los cuerpos transparentes tiene un límite teórico? ¿No estaremos ante otro caso de resultados a los que se llega por especulación sobre fórmulas matemáticas inadecuadas para determinados rangos de sus parámetros? La respuesta es que existen en la naturaleza índices de refracción iguales a 2, e incluso mayores. El diamante tiene un índice mayor que 2, y una esfera tallada en ese material tendrá su foco en un punto interior (no sé qué sucederá con una esfera de diamante expuesta al sol), algunas resinas naturales, exudadas por coníferas, poseen un índice de refracción que se aproxima mucho al valor 2, y no puede descartarse, según se ha especulado, que en determinados casos excepcionales de ausencia de viento e intensa radiación solar se produzcan espontáneos incendios en bosques, sin rayos ni colillas arrojadas por paseantes desaprensivos.

El arco iris

En una película de divulgación que todavía se pasa por televisión, una voz clásica de documental explica que el arco iris es un fenó-



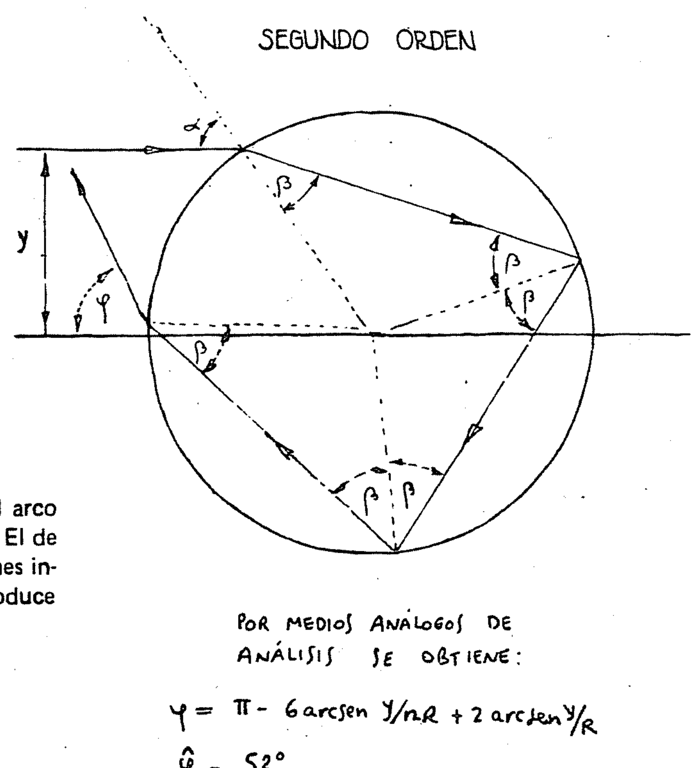


Figura 4:
Con un sólo reflejo interno obtenemos el arco iris más fuerte, que es el de primer orden. El de segundo orden corresponde a dos reflexiones internas. En las direcciones indicadas se produce la mayor abundancia de rayos luminosos.

meno originado en la refracción de la luz solar en las gotas de lluvia (lo que es cierto). Simultáneamente un dibujo animado muestra una gota de agua en forma de pera y un rayo de luz que avanza y se dispersa en colores. El esquema recuerda al de la dispersión de la luz en el prisma de Newton, pero si asimilamos la gota al prisma, los rayos refractan en la dirección equivocada, y los colores están también invertidos. Las gotas de agua, por otra parte, jamás tienen forma convencional de gota de agua, estén o no todavía sujetas a un objeto. La clásica forma de ojiva con que se la dibuja siempre es más un ideograma que un croquis, tal como ocurre con el corazón de la baraja y la verdadera forma de la víscera.

Además de controlar las ganas de mandar cartas al canal, he debido soportar comentarios del tipo: " ¡Qué bien que explica el arco iris esta película! ". Efectivamente, la explicación es muy clara, ¡pero se ha explicado *algo que no es cierto*!

El fenómeno de la dispersión en colores de la luz solar en las gotas de lluvia es un tanto más complejo, y su análisis requiere el cálculo diferencial o, alternativamente, una gran paciencia.

Tomemos la ampolla llena de agua y dejémosla expuesta al sol o a la luz de una vela o de una lámpara suficientemente alejada. Si miramos atentamente la ampolla veremos reflejada, por lo menos, una imagen de la fuente de luz. Bajo determinados ángulos de observación se ven tres imágenes, una por reflejo exterior, y dos por reflejo interno. Si desplazamos convenientemente la cabeza, lograremos fundir en uno solo a los dos reflejos interiores. Esta fusión da lugar a un único reflejo coloreado. El color cambia al modificar ligeramente la posición de la cabeza. Los colores son muy vistosos y se prestan a un tratamiento elemental con chicos de corta edad:

– ¡Miren, chicos! ¿Cuántos reflejos ven?
– ¡Tres!
– ¿Y ahora? Vení, correte un poco más.
– Ahora veo uno solo... y ahora tres otra vez.
– Correte de a poco hasta que se junten esos dos en uno solo... así— el maestro verá un débil arco iris proyectado contra el rostro del alumno; cuando el arco iris cruce su pupila, exclamará:
– ¡Colores! ¡Veo colores!
– Pues bien, hijo: así es como se forma el arco iris. Estos reflejos ocurren en muchísimas gotitas de lluvia, que cuando caen son mucho más perfectamente redondas que esta ampolla.
– ¡Señor! Una vez leí que en las puntas del arco iris hay potes de peltre llenos de monedas de oro.
– Yo en cambio leí que las monedas de oro se forman como resultado de la fricción de las ruedas de los carros, cuando las de atrás alcanzan a las de adelante, por ser más grandes.
– ¡Eh, señor! ¿Cómo las van a alcanzar? ¡Están clavadas!
– Bien, esto fue todo. Vayan y sigan jugando.

Más complicaciones

Para analizar la aparición de los colores, consideremos un haz de rayos solares que incide sobre la esfera en una determinada dirección, por ejemplo la horizontal (figura 4). Analicemos el camino de un rayo que incide a una distancia *y* del eje de simetría del problema.

Ese rayo se refracta y sale por otro punto como ya lo sabíamos cuando buscábamos la distancia focal. Pero en esa oportunidad nos desentendimos de la parte de luz que se reflejaba hacia adentro, y ahora haremos lo inverso: nos desentenderemos del rayo que emerge, y seguiremos con nuestra atención al reflejado. El camino que nos interesa es, pues, el siguiente: incidente, refractado, reflejado, refractado hacia afuera.

El formuleo forma parte de la misma figura. Mirándolo atentamente, sentimos otra vez la irresistible y sana tentación de pasarlo por alto y mirar directamente el resultado: Sin el menor remordimiento, encontramos que el resultado es:

$$\text{gamma} = 4.\text{arc sen}\,(y/R.n) - 2.\text{arc sen}\,(y/R)$$

donde gamma es el ángulo del rayo de salida con respecto al rayo de entrada, n es el índice de refracción, R es el radio de la esfera e *y* el parámetro de incidencia, que es la distancia entre el rayo analizado y el rayo central.

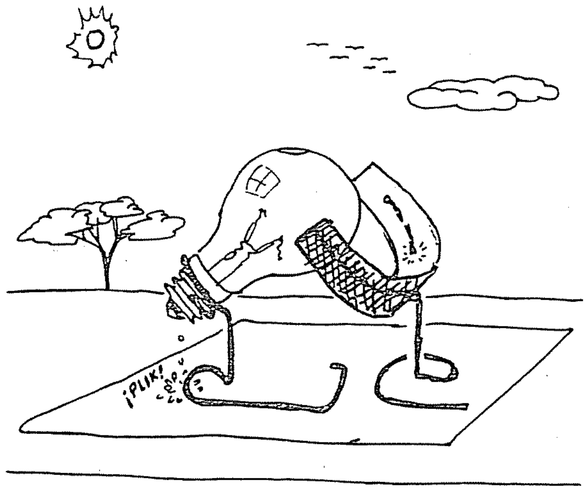


Figura 5:
Montaje improvisado para el registro de la heliofanía de un día.

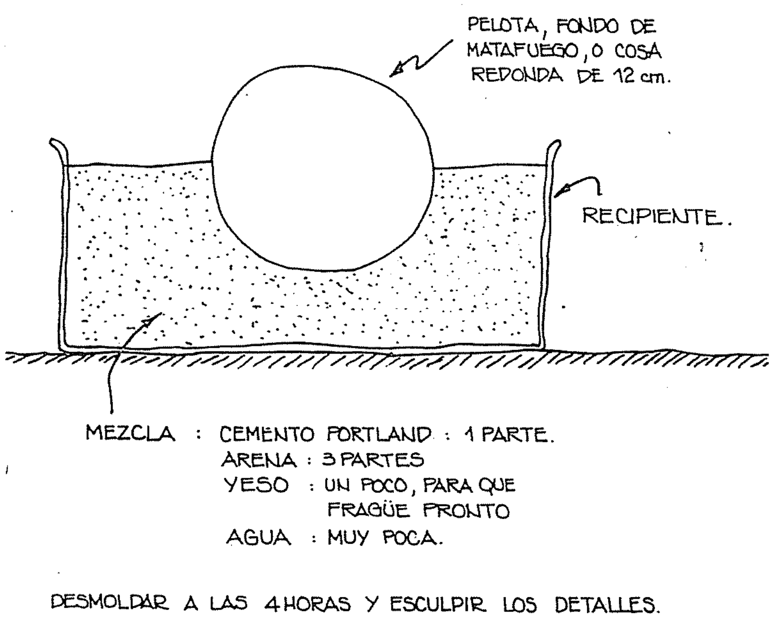


Figura 6:
Si no encontramos nada redondo del tamaño apropiado, hay que darle forma con la mano.

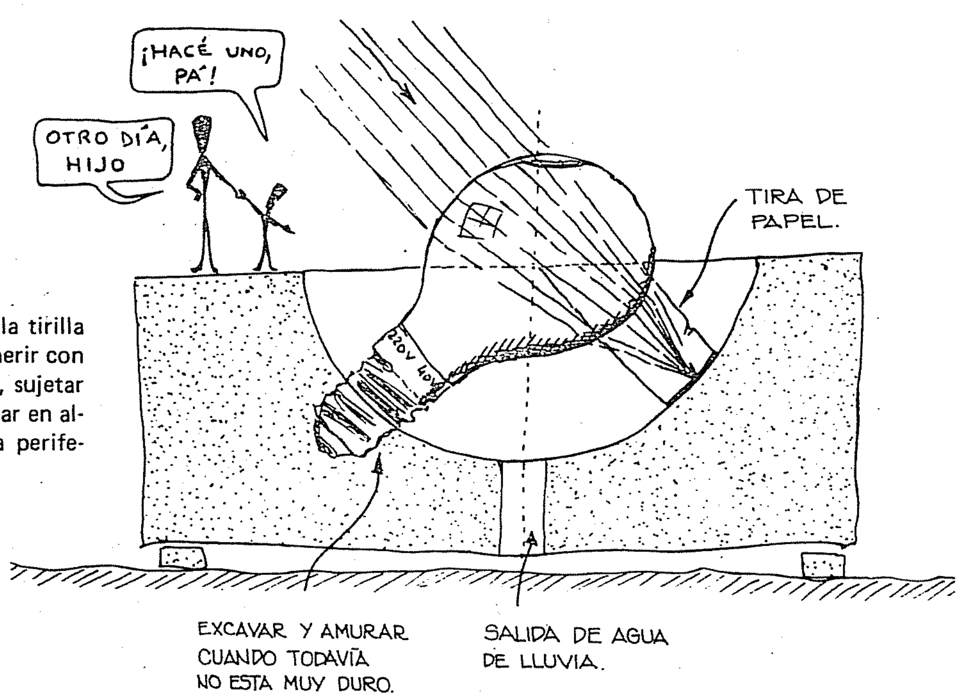


Figura 7:
Para que no se vuele la tirilla de papel se puede adherir con dos gotas de adhesivo, sujetar con contrapesos o clavar en alfileres amurados en la periferia, interiormente.

Una primera complicación es que, contra lo que se podría esperar, no es cierto que la luz sea dispersada en una dirección fija (¡qué lástima, hubiera sido fácil de analizar). Cada uno de los rayos paralelos, del haz incidente considerado, posee un diferente ángulo de salida gamma. Pero representemos el ángulo de salida gamma en función de y. Esta función tiene un máximo. El máximo puede hallarse con facilidad en la representación gráfica, que, por supuesto, se hará con una computadora, no cometeremos el anacronismo de usar tablas. Si no tenemos computadora, se puede hallar el máximo derivando gamma con respecto a y, igualando a cero la derivada y despejando y. Luego se reintroduce ese valor de y en la fórmula (en la anterior, por supuesto; si lo introducimos en la derivada obtendremos cero), y sabremos cuál es el ángulo máximo de desviación de la luz.

Si no recordamos cuál es la derivada del arco seno, es buena oportunidad para tratar de deducirla de la del seno, y sentirnos un poco como Stokes, cuando deducía todas las propiedades sin recurrir más que a lo que podía demostrar él mismo. La existencia de un máximo para el ángulo de desviación nos da la pista sobre el porqué de una dirección privilegiada: allí se produce un amontonamiento o sobreabundancia de rayos, de modo semejante a cuando regamos el jardín y hacemos movimientos de vaivén con la manguera: la flor más regada es la que tiene la suerte de estar justo en el máximo o el mínimo del ángulo. En consecuencia, el máximo refuerzo de este efecto óptico de arco iris ocurrirá precisamente en gamma máximo, que con el índice de refracción del agua respecto del aire (aproximadamente igual a 4/3), resulta ser de 42 grados.

Por tanto, el arco iris es un círculo que subtiende un ángulo de 42 grados con el puesto de observación, es un círculo completo (¡no habrá potes con monedas!), y lo hallaremos dando la espalda al sol.

¿Por qué los colores aparecían al superponer dos reflejos? No será que este análisis está equivocado, y que el arco iris se produce no por dispersión sino por interferencia? Hay cierta dificultad en analizar esto, que obedece a que en general los rayos de luz no son visibles, aunque sí es visible su luz. Los desplazamientos del puesto de observación en relación con la esfera daban lugar a que el observador viese los únicos rayos de luz capaces de llegar hasta su pupila, y para determinadas posiciones hay dos soluciones, para otras ninguna y para una en particular hay una única solución, que consiste en un único reflejo, que forzosamente es el del ángulo de salida máximo. Los colores obedecen a que el índice de refracción del agua no es el mismo para todos los colores que constituyen la luz blanca. El violeta es más refractado que el rojo.

Arco iris de segundo orden

Es frecuente poder observar, y hasta fotografiar, dos arcos iris simultáneos: el de 42 grados y otro adicional a 52 grados, más débil y con los colores al revés. El arco iris de segundo orden proviene de *dos* reflexiones internas, y por esa razón es más débil. Puede observarse en la ampolla, sea con sol o luz artificial, siempre que miremos hacia el otro borde de la ampolla respecto de dónde aparecen los colores del arco iris primario, también con el viejo truco de hacer que se fundan dos reflejos internos en uno.

Del mismo modo podremos buscar arcos iris de tercero, cuarto y quinto orden, pero, como es fácil imaginar, serán cada vez más débiles y se confundirán con el fondo de iluminación e imperfecciones ópticas de la esfera.

La heliofanía

Si no hubiera atmósfera (o si no hubieran nubes), cada día del año tendría, para cada latitud, una determinada cantidad de horas de sol. La presencia de nubes reduce esa cantidad a una fracción conocida como *heliofanía relativa*, cuya medición tuvo interés en estudios helioenergéticos. Todavía existen en varias estaciones meteorológicas aparatos denominados *heliofanógrafos de Campbell-Stokes* con los que se la registra.

El heliofanógrafo

Conocido el hecho de que con la ampolla podemos quemar un papel, y aprovechando la simetría de este concentrador de rayos, y el hecho de que el sol describe círculos en su movimiento respecto de la tierra, puede disponerse una tira de papel en forma de arco circular a distancia conveniente de la ampolla, de modo que el sol, en su movimiento, trace un surco ígneo sobre la banda de papel, la que constituirá un registro ininterrumpido si el día estuvo despejado, y presentará interrupciones si se interpusieron nubes u otros obstáculos.

La figura 5 muestra cómo improvisar el montaje para obtener un registro de un solo día, y las figuras 6 y 7 indican cómo construir un heliofanógrafo apto para funcionar en cualquier latitud y todos los días del año, cambiando cada día la faja de papel.

Temas sueltos

- No olvidar la ampolla en lugar donde le dé el sol y pueda producirse un incendio. Precaución análoga debe adoptarse con material óptico en exhibición.
- El papel carbónico, por su color obscuro y consecuente absorción, se quema con mayor facilidad que el papel blanco. Sin embargo, cierta clase de carbónico propaga la brasa, y por ello no sirve de registro.
- El índice de refracción del agua se puede determinar con una palangana y pequeños objetos sumergidos, alineando convenientemente la visual. No es fácil razonar ese problema, porque nuestra cultura gráfica nos conduce a intentar la visualización de los rayos de luz, en vez de pensar en ellos como direcciones o rectas imaginarias.
- El índice de refracción del agua (y el de otras sustancias) cambia con la temperatura. Esto permitió la construcción de un filtro llamado *filtro Lyot*, que se usa en heliofísica, que consiste en un polvo cristalino inmerso en un líquido. Para cada temperatura existe un color para el que el índice de refracción del cristal es igual al del líquido, y el conjunto presenta transparencia absoluta; así se tiene un filtro cuyo color puede controlarse con un termostato.
- Si se cuelga una gota de agua de una jeringa y se la examina con una lupa o pequeño microscopio, se observarán cómodamente los efectos ópticos que mencionamos para esferas y ampollas.
- La técnica del heliograbado consiste en la quemazón de una superficie de madera con una lupa de unos 8 centímetros de diámetro. El artista trabaja con anteojos oscuros, y controlando tiempo y distancia logra atractivos efectos de trazado y esfumado. No es un oficio para noctámbulos.
- El color blanquecino que presentan ciertas lámparas quemadas obedece al óxido de tungsteno que se produce cuando hay pérdida de hermeticidad.
- En casas de regalos venden ("para ejecutivos") un objeto denominado *relaxing egg*, que consiste en una esfera imperfecta de vidrio, que en algún tiempo formaba parte de los equipos de laboratorios de enseñanza, para mostrar efectos de aberración de esfericidad y astigmatismo. Al igual que las cuatro esferitas que chocan, su uso didáctico ha desaparecido, y ahora se le atribuyen propiedades relajantes y se regala a los gerentes. Lo mismo sucede con el láser, ausente en escuelas y presente en discotheques, o con las computadoras que simulan alunizajes, que sólo encontramos en los lugares de diversión. ¿Llegaremos a ver el anillo de Gravesandre usado como pisapapeles?

Conclusiones

El propósito de este artículo fue el de señalar que no hay problemas elementales y problemas complejos; los problemas son eternos, y lo que es elemental o complejo es la forma de encararlos. Si al encarar un problema lo encontramos confuso, debemos consolarnos pensando que cuando lo estudiemos con mayor profundidad, lo encontraremos aún más confuso, puesto que las preguntas complejas originan respuestas complejas, jamás soluciones. Pero probablemente el conocimiento no sea otra cosa que el tránsito de las confusiones de orden uno a las confusiones de orden superior.

BIBLIOGRAFIA

RAINWATER, Clarence: *Luz y color*, Daimon, Provenza, 1971.

ROSSI, Bruno: *Optics*, Addison-Wesley, Massachusetts, 1959.

Sección de Taller y Laboratorio de Investigación y Ciencia (Scientific American): *Misterios del Arco Iris. Sus bellos arcos supernumerarios*, agosto de 1980.